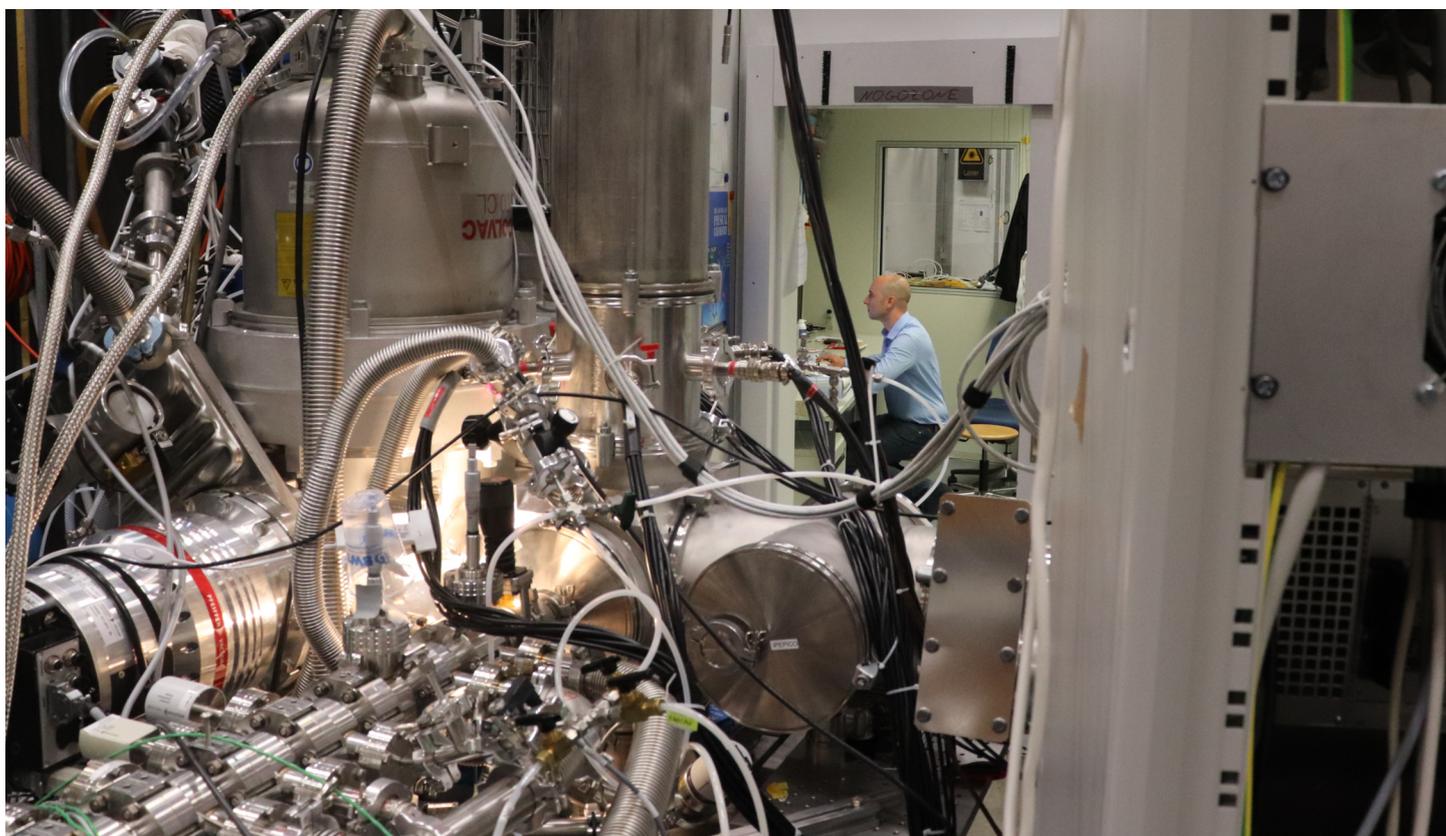


# COMMENT LA SUIE APPARAÎT

Pour les ramoneurs, la suie est un dépôt qu'il convient d'éliminer par brossage afin d'éviter les feux de cheminée. Pour les médecins, il s'agit d'une poussière fine nocive pour les poumons. Elle représente encore autre chose pour les chimistes: pour eux, la suie est une accumulation de molécules carbonées. Les particules ainsi produites sont le résultat de processus de formation de suie complexes dans le cadre d'une combustion. Dans un projet de recherche financé par l'OFEN, les chimistes de l'Institut Paul Scherrer de Villigen (AG) ont étudié les premières étapes de ce processus. Les résultats de la recherche fondamentale pourraient aboutir sur des moteurs à combustion plus propres à moyen terme et contribuer à la production de biocarburants.



Recherche sur la formation de la suie à l'Institut Paul Scherrer : Dr Patrick Hemberger enregistre et analyse les données de l'expérience (au premier plan) sur ordinateur. Photo: B. Vogel

Cela peut sembler surprenant mais la suie est un élixir de vie pour l'humanité. Dans les premières civilisations avancées des Égyptiens et des Chinois, la poudre de carbone noir était obtenue par la combustion de résines et d'huiles végétales et transformée en encres précieuses pour finalement ouvrir la voie à l'écriture et à l'art. Pendant des siècles, la production de noir de carbone de première qualité est restée une technique culturelle éprouvée dans de nombreuses variétés. Au 19<sup>e</sup> siècle, le noir de carbone est devenu une matière première recherchée pour la production industrielle: le « noir de carbone » obtenu à partir du gaz naturel, par exemple, est désormais utilisé comme charge de renforcement pour la production de pneus.

Aujourd'hui, le grand public perçoit surtout le côté problématique de la suie. Le sous-produit des processus de combustion incomplets est considéré comme polluant et nocif pour la santé. En 2012, l'Organisation Mondiale de la Santé a classé les particules de suie très fines des moteurs diesel dans la catégorie des substances cancérigènes. Mais il y a également de bonnes nouvelles: une technologie de combustion optimisée et des filtres à particules peuvent réduire considérablement les émissions de poussières fines. Les filtres éliminent plus de 99% des particules de suie des gaz d'échappement.

### Plusieurs centaines d'étapes réactionnelles jusqu'à l'obtention de particules de suie

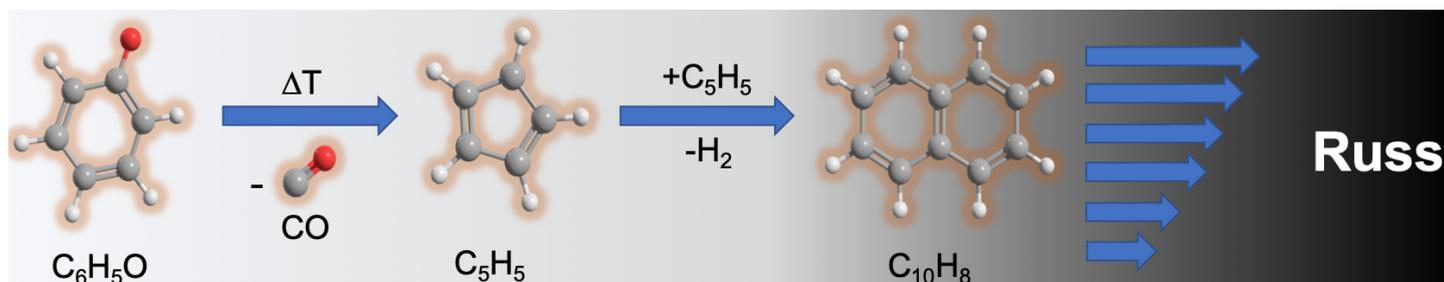
« Si nous voulons réduire davantage les émissions de suie à l'avenir, nous devons comprendre comment la suie est produite », déclare le Dr Patrick Hemberger, chimiste à l'Institut Paul Scherrer PSI à Villigen (AG). La formation de la suie lors de la combustion est un processus complexe dont la science ne comprend pas encore tous les détails. C'est également lié aux très courtes périodes de production de la suie. Un regard sur un moteur diesel peut illustrer ce point: s'il fonctionne à

## LES MOLÉCULES ÉPHÉMÈRES

La formation de la suie au cours d'un processus de combustion dure quelques microsecondes et se compose de plusieurs centaines d'étapes intermédiaires. La composition des échantillons de gaz peut être déterminée à l'aide des méthodes spectroscopiques classiques. Cela implique toutefois que les substances soient stables (durée de vie de plus de quelques minutes), les produits intermédiaires ne pouvant être détectés que de manière indirecte. Des équipements de recherche modernes permettent d'observer directement ces processus de formation. Au PSI, une méthode de mesure spéciale est utilisée à cette fin: la spectroscopie de coïncidence des photo-électrons et des photoions (PEPICO). PEPICO permet l'identification détaillée d'échantillons de gaz éphémères qui n'existent que pendant quelques microsecondes avant de réagir à d'autres substances.

Les chercheurs du PSI mènent leurs expériences à « La Source de Lumière Suisse » (SLS). Les électrons sont accélérés dans le tunnel circulaire de la SLS qui émet alors une lumière d'un type particulier. Ce rayonnement dit synchrotron est utilisé dans 20 stations expérimentales pour des études de toutes sortes. Patrick Hemberger et son équipe analysent les processus de formation de la suie dans l'une d'elles. BV

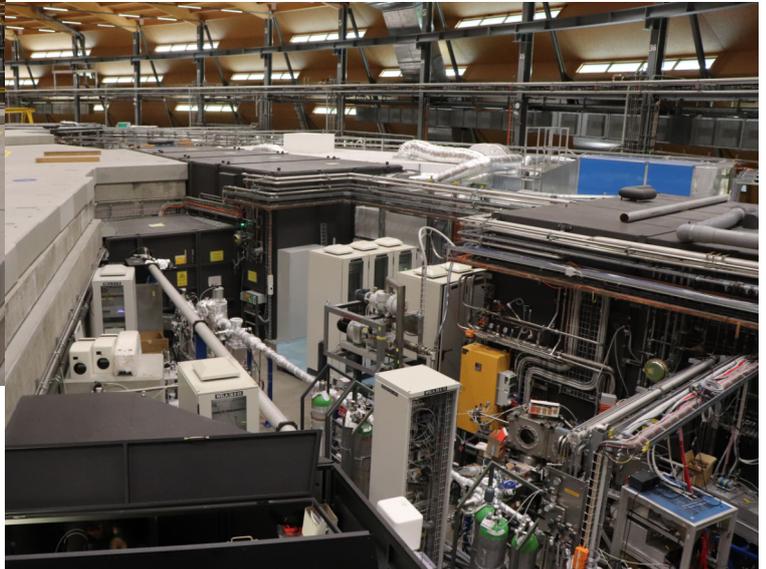
3600 tours par minute, le mélange de carburant dans le cylindre, dont l'énergie chimique stockée entraîne la voiture, s'enflamme 30 fois par seconde. Pour le formuler simplement, le cycle de combustion dure un quart de ce temps, soit environ huit millisecondes. Une période très courte – mais encore très longue pour le chercheur. En effet, le processus chimique de formation de la suie dure une fraction de ce délai, seulement quelques microsecondes.



Une réaction de formation typique des molécules précurseurs de la suie: les produits de dégradation du carburant contenant de l'oxygène (boule rouge = atome d'oxygène) se décomposent par décomposition du monoxyde de carbone (CO) en un produit intermédiaire à 5 anneaux (C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>). Ce dernier réagit pour former du naphthalène (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>), un précurseur typique de la suie. La suie est générée par une multitude de telles réactions. Illustration: Patrick Hemberger



Regard sur « La Source de Lumière Suisse » (SLS) à l'Institut Paul Scherrer à Villigen, en Argovie: sous les dalles de béton se trouve le tunnel circulaire avec l'anneau d'accélération (marquage jaune). Les électrons y sont en orbite et émettent une lumière synchrotron qui peut être utilisée pour diverses expériences. Photo: B. Vogel



Patrick Hemberger et son équipe analysent les processus de formation de la suie dans l'une des stations expérimentales. La lumière synchrotron est guidée vers l'expérience dans le tube à vide enveloppé dans un isolant thermique argenté. Photo: B. Vogel

Les chercheurs du PSI se concentrent sur cette période extrêmement courte lorsqu'ils analysent la formation de la suie. On le sait aujourd'hui: le processus chimique de formation de la suie se déroule en plusieurs centaines d'étapes réactionnelles. « Nous concentrons nos recherches sur la première ou les deux premières de ces centaines d'étapes réactionnelles sur le long chemin qui mène à la particule de suie », explique Hemberger. Tout commence avec une molécule simple comme celle qui est produite à partir du carburant diesel par la séparation d'un atome d'hydrogène. Cette molécule s'oxyde (brûle) soit avec l'oxygène, soit elle cherche d'autres partenaires de réaction et se transforme alors en suie. Dans le second cas, la molécule précurseur de la suie se lie à de nouveaux atomes de carbone et d'hydrogène ou à des molécules d'hydrocarbures en plusieurs centaines d'étapes. Il en résulte une structure de plusieurs milliers d'atomes que nous connaissons sous le nom de particules de suie. Les deux principales molécules antérieures sont les hydrocarbures benzène ( $C_6H_6$ ) et naphthalène ( $C_{10}H_8$ ) (voir la figure p. 2).

### Formation de suie de molécules individuelles et dans des échantillons de gaz

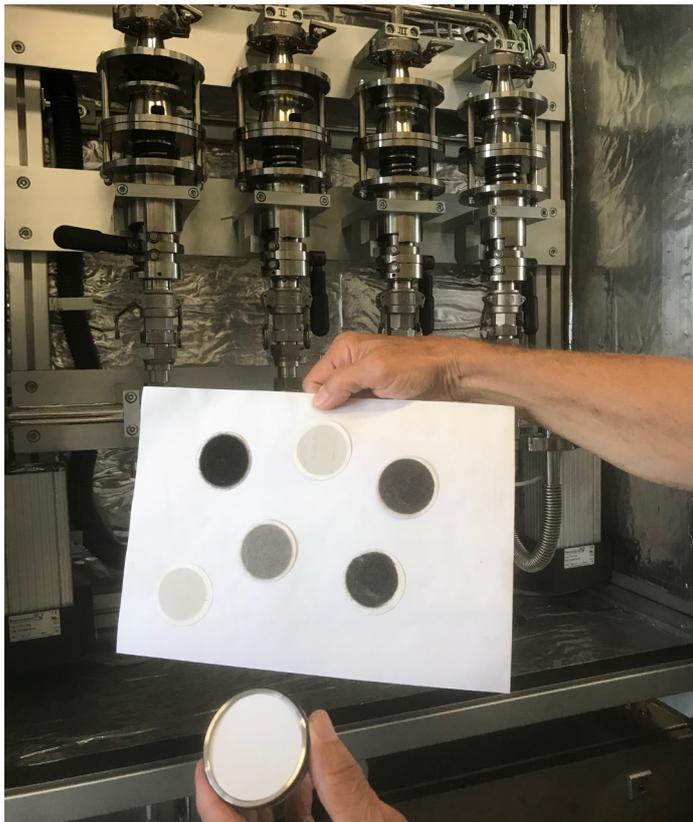
Dans un projet de recherche financé par l'OFEN, les chercheurs du PSI sont parvenus à décrire les propriétés de diverses molécules précurseurs de la suie et à déterminer la durée des différentes étapes réactionnelles. Ces études ont été

menées à la « Source de Lumière Suisse » du PSI, une grande installation de recherche circulaire dont le tunnel d'accélération a une circonférence de 288 mètres. La lumière générée ici permet de comprendre les tissus et les matériaux jusqu'au niveau des atomes individuels. C'est pourquoi l'installation est également décrite comme un « microscope » très puissant qui permet, entre autres, de réaliser des expériences avec de la lumière ultraviolette sous vide (voir encadré p. 2). Les scientifiques ne se sont pas intéressés uniquement à la formation de la suie à partir de molécules précurseurs individuelles, mais également à l'interaction de nombreuses molécules, comme on peut l'observer dans la formation de la suie dans une flamme.

Un des résultats de cette recherche, mentionné ici à titre d'exemple, concerne les radicaux allyle ( $C_3H_5$ ). Ces hydrocarbures sont un produit intermédiaire du processus de formation de la suie. Dans le cadre d'une collaboration internationale (PSI, Université de Würzburg, Université de Kiel et Université du Pacifique/États-Unis), les chercheurs ont pu montrer que le processus d'oxydation de ces molécules durait moins d'une milliseconde dans certaines conditions. Lorsque les chimistes connaissent la vitesse de réaction (« constante de vitesse ») d'une molécule, ils peuvent en déduire comment la molécule est susceptible de se développer pendant le processus de formation de la suie.

### Nouveaux modèles de combustion

Sur la base des constantes de vitesse et d'autres résultats de recherche, les scientifiques peuvent formuler des modèles décrivant mathématiquement la formation de la suie. Comme l'affirme Patrick Hemberger, ceux-ci forment une mosaïque pour l'illustration des processus de combustion: « Nos modèles se basent sur des étapes réactionnelles intermédiaires individuelles. Il reste encore un long chemin à parcourir avant l'émergence d'outils informatiques utilisables dans la recherche sur les moteurs industriels. En effet, un mélange de carburant est constitué d'innombrables molécules, et pour chacune d'entre elles, il faudrait inclure dans le modèle des informations sur les chaînes réactionnelles et les concentrations d'oxygène. L'ensemble du système devrait alors être modélisé selon les lois de la dynamique des fluides. C'est la musique du futur. Par conséquent, les développeurs de moteurs doivent, aujourd'hui encore, travailler avec des modèles très simplifiés ».



La teneur en suie des gaz d'échappement des moteurs diesel peut être déterminée à l'aide d'équipements de mesure appropriés (arrière-plan). Les filtres proviennent de mesures de gaz d'échappement avec différents degrés de teneur en suie. La suie se compose d'une multitude de particules de formes et de tailles différentes. Photo: B. Vogel

## COOPÉRATION INTERNATIONALE

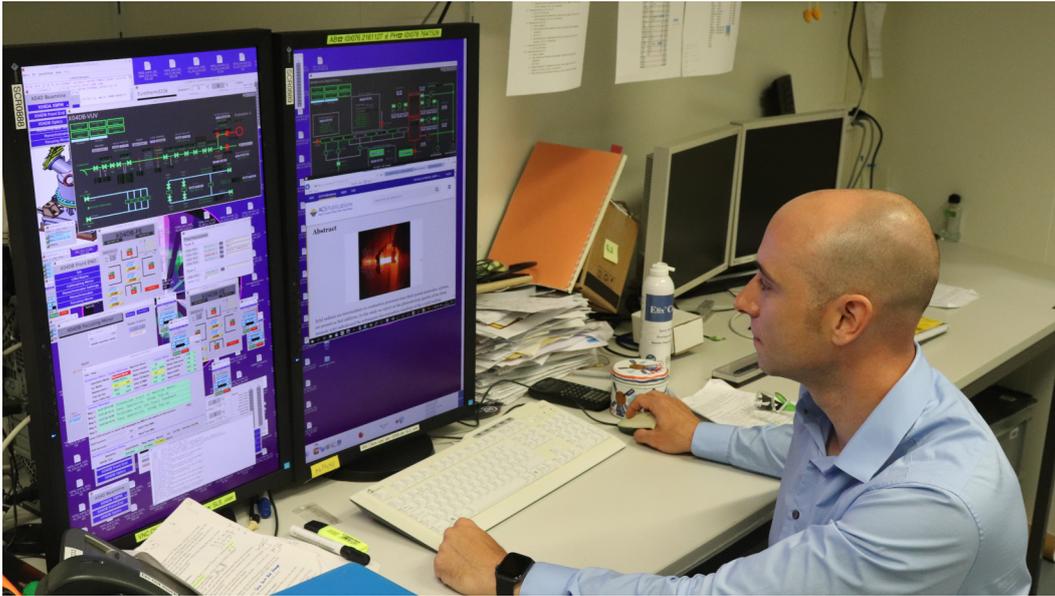
L'Institut Paul Scherrer à Villigen (AG) appartient au domaine des EPF et est le plus grand institut de recherche scientifique de Suisse. Les scientifiques du PSI entretiennent un échange international intense dans l'étude des réactions de dégradation des carburants. Ils sont ainsi étroitement impliqués dans le programme technologique de l'Agence internationale de l'énergie « Combustion propre et efficace » (sous-groupe « Chimie de la combustion »). BV

➔ <https://www.ieacombustion.com>

Même si la recherche fondamentale au PSI n'est pas utilisable directement dans l'industrie automobile, elle pourrait permettre la construction de moteurs moins polluants à moyen terme, par exemple en testant et développant les modèles existants dans le cadre d'expériences. C'est déjà le cas aujourd'hui en coopération avec le Centre aérospatial allemand (DLR) et l'Université de Duisburg-Essen. Ici, la composition de flammes bien définies est analysée et comparée à des modèles théoriques. A plus long terme, les modèles pourront ainsi être améliorés et leur pouvoir prédictif augmenté.

### Intégration de précurseurs de suie azotée

Les résultats des recherches sur la formation de la suie sont également pertinents pour les futurs biocarburants à base de lignines. Les lignines sont des macromolécules qui constituent environ 30% de la masse sèche des plantes. Ces composés organiques peuvent être divisés à haute température par pyrolyse catalytique (conversion en l'absence d'oxygène) (le procédé était déjà appliqué autrefois en temps de crise pour la production de gaz de bois). Toutefois, ce procédé n'a pas été très efficace jusqu'à présent et n'en vaut guère la peine. Des procédés optimisés et de meilleurs catalyseurs sont donc requis. La condition préalable est une meilleure compréhension des processus chimiques sous-jacents auxquels les chercheurs du PSI travaillent. De cette manière, des biocarburants durables pourraient être produits à l'avenir avec le soutien du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS). En utilisant des catalyseurs spécifiques et dans des conditions de réaction précisément coordonnées, une grande variété de produits chimiques fins pourrait être produite, comme l'espèrent les scientifiques participants.



Le chercheur du PSI, Dr Patrick Hemberger, sur son poste de travail à la SLS. Photo: B. Vogel

Un nouveau projet de recherche au PSI vise à poursuivre le travail de ces dernières années et à acquérir de nouvelles connaissances. L'idée de base est d'inclure l'azote dans l'analyse des processus de formation de la suie. C'est une question pertinente dans la mesure où les précurseurs de suie azotée, nocifs pour l'homme et l'environnement, peuvent être produits, par exemple, lors de la combustion de biocarburants. Une motivation supplémentaire concerne la combustion de mélanges d'hydrocarbures et d'ammoniac dans les turbines à gaz, ces dernières étant promues dans le monde entier. A cette fin, des modèles chimiques avancés doivent être développés afin de bien décrire ce processus.

- Le **rapport final** du projet de l'OFEN « Untersuchung von Russbildungsprozessen mit VUV Synchrotronstrahlung und ultrakurzzeit Laserspektroskopie » est disponible sur:  
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36859>
- Stephan Renz ([info@renzconsulting.ch](mailto:info@renzconsulting.ch)), directeur du programme de recherche de l'OFEN sur les systèmes d'énergie basés sur la combustion, communique des **informations** sur le projet.
- Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et de démonstration dans le domaine de la combustion sur [www.bfe.admin.ch/ec-combustion](http://www.bfe.admin.ch/ec-combustion)